



Memoria del proyecto para optar al Título de  
Ingeniero Civil Oceánico

# EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICA DE IMPLEMENTAR UN DISPOSITIVO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN CHILE

Pablo Ignacio Díaz Piccardo

Noviembre 2021

EVALUACIÓN DE PREFACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE  
IMPLEMENTAR UN DISPOSITIVO DE CAPTACIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ  
EN CHILE

Pablo Ignacio Díaz Piccardo

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
MANUEL MENESES ZÚÑIGA Profesor guía	_____	_____
FELIPE CASELLI BENAVENTE Revisor	_____	_____
MATÍAS QUEZADA LABRA Revisor	_____	_____

## DECLARACIÓN

*Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.*

*La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.*

---

Memorista  
**Pablo Díaz Piccardo**

---

Profesor Guía  
**Manuel Meneses Zúñiga**

*A mis padres y a Adela, mi abuela:  
Gracias por la paciencia y la confianza.*

## AGRADECIMIENTOS

El proceso universitario es un hermoso y rudo camino lleno de desafíos y obstáculos, donde es fácil caer, perder o rendirse. Sobrevivirlo solo es muy difícil y es ahí donde la gente que estuvo a mi alrededor, en este momento, se viene a mi mente para agradecerles.

Quiero partir agradeciendo a mi Comisión Evaluadora, por el tiempo dedicado a la revisión de mi Proyecto de Título y su tremenda disposición a ayudarme cuando lo requerí. Manuel, Matías, Felipe: ¡Muchas gracias!

Agradezco a Niels Arpe Hansen, del equipo WaveStar, por ayudarme con su información siempre que lo requerí. Muchas gracias.

Agradezco también a aquellos profesores que, más que profesores, fueron maestros. Es decir, además de ser tremendos profesionales y académicos, con un nivel de excelencia, también lograron traspasar otros aspectos, muchas veces intangibles, que hoy valoro y atesoro. Álvaro Valdivia, Felipe Caselli, Jimmy Schlegel, Alejandro Pérez Lolas, Patricio Winckler y Matías Quezada; ¡Muchas gracias!

Es imposible no mencionar acá a ARMe Ingenieros Consultores, empresa que me abrió las puertas para iniciarme en el mundo laboral y que hoy, luego de 3 años, me siguen brindando todo su apoyo y confianza. A Theo Rojas, Pablo Aguilera, Cindy Bernal Ponce y Nataly Erpel: Gracias por todo el apoyo y confianza.

Agradezco a aquellas personas que sin interés alguno aportaron con su más honesta ayuda en el proceso de elaboración de este documento. A Cindy Bernal Ponce y Francisco Celis: Muchas gracias, sin duda cada aporte me fue de mucha utilidad para poder continuar con la elaboración de este documento.

Desde antes de mi ingreso a Oceánica, contaba ya con el apoyo de 2 tremendísimos amigos. Y es aquí donde agradezco tremendamente a Álvaro Cortés (alias arbolito) y Juan Ignacio Vásquez por su incesable amistad pese a todos los torbellinos que la vida nos ha ido poniendo a cada uno. Son mis hermanos y lo saben.

También quiero mencionar a quien me acompañó y brindó soporte durante gran parte de la carrera: Leonor Lepin. Muchas gracias por todo y espero que la vida te brinde toda la alegría y éxito que mereces.

No puedo no mencionar también a aquellos amigos que conocí dentro de la universidad: Calienes, Encina, Mariana, Goodeve, Jordy, Bayron, Juank y Pancho Pinto. Son lo más grande cabros y espero que la vida los trate todo lo bien que merecen. Y quiero enfatizar en los 4 primeros, quienes no solo son amigos, sino que son hermanos: Calienes y Encina, mis compañeros de generación, gracias por todo el apañe, los momentos de

risas, conversaciones freak y la tremenda dinámica que entre nosotros existe; Goodeve, hermano, lo mejor de un ser humano está en ti y por eso doy las gracias por haberte conocido y por haberme permitido ser tu amigo; y finalmente, Mariana, la traidora, mi amiga del alma, mi compañera de 3.000 batallas, tanto en la vida como en la U... sin dudas el estar escribiendo esto hoy no sería posible si no te hubieses cruzado en mi vida. Estoy profundamente agradecido de lo que ha sido tu presencia en mi vida y estaré eternamente en deuda por lo mismo. Gracias amigas, mil gracias por todo. Te amo y espero que seas eterna.

Por supuesto, sin dudas, agradezco a mi familia. Agradezco a mis primas, María Ignacia (te debo una gigante), María José y María Francisca por todo el apoyo incondicional y apañe, Agradezco a mis primos, en especial a Daniel, quien más que primo ha sido un tremendo amigo. Agradezco también a mi primo político, Francisco Celis, lo más grande. Agradezco a mis tías y tíos, en especial a Carlos, quien siempre me brindó ayuda en los momentos que académicamente más lo necesité. Agradezco a mi abuela, Adela (a quien también le dedico este trabajo) por todo lo que me hinchó para que concretara esta fase de mi vida... y también, para no ser injusto, por la tremenda abuela que es.

Otra parte de mi familia, la más importante: Mis padres, hermano y cachorra. Marco, Alejandra, Oscar y Nala, nada de lo que escriba acá hará justicia con todo lo agradecido que estoy de ustedes y lo en deuda que estaré para siempre. Los amo y gracias, mil gracias, por todo. Para ustedes también es este trabajo.

Agradezco a mi polola y compañera de vida, Miroslava Vrsalovic. Has sido fundamental en el término de este proceso, con todo tu amor, ternura y comprensión, que tanta necesitaba. Te amo muchísimo y espero que esta ruta siga creciendo. También agradezco a nuestra cachorra, Mile, por venir a llenarme de ánimo y amor con sus 4 patitas y esas tremendas churejas.

Agradezco a los que ya no están. A mis abuelos paternos Rodolfo y María: sin ustedes, por más obvio que parezca, nada de esto hubiese sido posible. Y agradezco en especial a mi abuelo materno Oscar, que no hay día que no lo extrañe y me hubiese encantado que pudiese presenciar en este momento. Hay muchas cosas que le agradezco y con las que quedé en deuda, pero sin dudas, simbólicamente, trato de pagarlas día a día. Un abrazo al cielo de tu *corazón azul*. También le agradezco a mi cachorra Capelina, que ni siquiera entendería este texto, pero se lo debo, por ser mi más fiel compañera y brindarme su amor más puro e incondicional...eternamente agradecido de ti, mi perrita hermosa.

Finalmente, mis agradecimientos a todos los que contribuyeron en este proceso y documento, y que sus nombres en este momento se me escapan. Muchas gracias.

*P.D: Gracias Pablo del pasado por todo lo que recorriste para llegar hasta acá. Y Pablo del futuro, espero que este tremendo esfuerzo sea una herramienta más para conseguir todo lo que soñamos.*

## **CONTENIDO**

1	Introducción .....	1
2	Alcance.....	3
3	Objetivos.....	4
3.1.	Objetivo general .....	4
3.2.	Objetivos específicos.....	4
4	Marco teórico.....	5
4.1.	Contextualización del escenario energético mundial.....	5
4.2.	Contextualización del escenario energético nacional.....	7
4.3.	Mercado energético de Chile .....	9
4.3.1.	Oferta de energía eléctrica .....	11
4.3.2.	Energía generada.....	12
4.3.3.	Consumo y clientes .....	13
4.4.	Matriz energética de Chile .....	14
4.5.	Energía marina .....	15
4.5.1.	Energía de las corrientes oceánicas .....	16
4.5.2.	Energía del gradiente salino .....	16
4.5.3.	Energía maremotérmica ("OTEC").....	16
4.5.4.	Energía mareomotriz .....	17
4.5.5.	Energía undimotriz.....	17
4.6.	Estado del arte dispositivos undimotrices .....	19
4.7.	Oleaje de Chile .....	25
4.7.1.	Mar de fondo reinante.....	25
4.7.2.	Mar de fondo del noroeste .....	26
4.7.3.	Oleaje oceánico de generación local .....	26
4.7.4.	Oleaje extremo .....	26
4.7.5.	Oleaje en bahías cerradas, fiordos, canales y lagos .....	27
4.7.6.	Oleaje insular.....	27
4.7.7.	Oleaje antártico .....	27
4.8.	Explorador de Energía Marina .....	27
4.8.1.	Implementación del modelo de oleaje WaveWatch III.....	28
4.8.2.	Implementación del modelo de oleaje SWAN .....	30



4.8.3.	Validación.....	32
4.9.	Normativa de la energía marina en Chile.....	36
4.9.1.	DFL 340/1960 Concesiones Marítimas.....	37
4.9.2.	Ley 20.249 Espacio Costeros.....	37
4.9.3.	Política Nacional de Uso del Borde Costero del Litoral de la República.....	38
5	Metodología.....	39
5.1.	Selección del dispositivo.....	39
5.2.	Selección del punto de ubicación del dispositivo.....	40
5.3.	Clima de oleaje en el punto de ubicación del dispositivo.....	40
5.4.	Estimación generación energética del dispositivo en el punto de ubicación.....	40
5.5.	Estimación de costos del dispositivo.....	40
5.6.	Estimación de ingresos del dispositivo.....	40
5.7.	Evaluación económica.....	41
6	Aplicación de la metodología a la localidad de Lebu, Región del Bío Bío.....	42
6.1.	Dispositivo caso práctico: WaveStar.....	42
6.2.	Ubicación del dispositivo de captación.....	44
6.3.	Estimación de la altura de ola: punto de proyecto.....	47
6.4.	Estimación generación energética del dispositivo.....	49
6.5.	Estimación de costos.....	51
6.6.	Estimación de ingresos.....	56
7	Resultados Evaluación económica.....	58
7.1.	Flujo de caja.....	58
7.2.	Análisis de sensibilidad.....	59
7.2.1.	Variación anual del precio medio de inyección de energía.....	59
7.2.2.	Variación anual del PRECIO DE POTENCIA.....	60
7.2.3.	Variación de la capacidad de generación.....	61
7.2.4.	Variación del costo inicial del WaveStar.....	62
7.2.5.	Análisis multivariado.....	63
8	Conclusiones.....	70
9	Discusión.....	74
10	Bibliografía.....	77
11	Anexo 1: Flujo de caja de caso práctico.....	82

12	Anexo 2: Correos de consultas con proveedor WaveStar .....	83
13	Anexo 3: Mapa normativo del sector energético de Chile .....	84

## **LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Capacidad instalada en Chile por sistema.....	11
Tabla 2: Parámetros de oleaje y potencia teórico del punto del proyecto, en valores medios.....	48
Tabla 3: Potencia real generada por dispositivo WaveStar en el punto del proyecto.....	49
Tabla 4: Costo por kilómetro de cable para instalación eléctrica,.....	52
Tabla 5: Costo por kilómetro de instalación cable para transporte de energía eléctrica. ..	52
Tabla 6: Costo total de suministro de cable para proyecto.....	53
Tabla 7: Costo total de instalación de cable para proyecto. ....	54
Tabla 8: Detalle costo inicial del WaveStar. ....	54
Tabla 9: Costo total de implementación de WaveStar en Lebu. ....	55
Tabla 10: Costo anual de operación y mantención del WaveStar. ....	55
Tabla 11: Vida útil de los elementos del WaveStar. ....	55
Tabla 12: Ingresos generados por dispositivo WaveStar anualmente. ....	56
Tabla 13: Crecimiento anual del Pe y PP.....	57
Tabla 14: Resumen flujo de caja de instalación de WaveStar en la costa de Lebu, .....	58
Tabla 15: Inflación en Chile periodo 2000-2020.....	64
Tabla 16: Resumen de consideraciones para análisis de Monte Carlo. ....	64

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1: Perspectivas globales de la transición energética.....	6
Figura 2: Megatendencias claves para el futuro de la energía en Chile. ....	8
Figura 4: Principales metas año 2050.....	9
Figura 5: Capacidad instalada por sistema eléctrico en Chile. ....	12
Figura 6: Generación eléctrica bruta nacional en GWh.....	13
Figura 7: Evolución de los retiros de energía eléctrica en GWh. ....	14
Figura 10: Evolución de la oferta de energía primaria en Tcal. ....	15
Figura 11: Composición de la oferta de energía primaria por energético en Tcal.....	15
Figura 12: Clasificación de acuerdo a dimensión y orientación de los dispositivos. ....	21
Figura 13: Modo de operación de la columna de agua oscilante.....	22
Figura 14: Modo de operación de estructura flotante con múltiples cuerpos. ....	23
Figura 15: Modo de operación por diferencia de presión. ....	24
Figura 16: Modo de operación por sobrepaso.....	24
Figura 17: Modo de operación dispositivos oscilantes por oleaje.....	25
Figura 18: Dominio espacial modelo WaveWatch III. ....	29
Figura 19: Promedio del año 2010 de velocidades y dirección del viento con datos CFSR, en m/s.....	29

Figura 20: Concentración de hielo en el océano Pacífico según estación. Otoño (MAM), invierno (JJA), primavera (SON) y verano (DEF). .....	30
Figura 21: Grillas de resolución espacial modelo SWAN. ....	31
Figura 22: Batimetría y línea de costa utilizadas en modelo SWAN. ....	32
Figura 23: Promedio de Hs simulada por Wavewatch III. ....	33
Figura 24: Promedio de Hs satelital (AVISO). ....	34
Figura 25: Diferencia del campo medio de Hs observada y simulada. ....	34
Figura 26: Correlación de las series Hs simuladas y observadas mediante satélite. ....	35
Figura 27: Sitios de medición de oleaje.....	35
Figura 28: Diagrama de dispersión de altura significativa observada in situ v/s simulada por SWAN a 1 km de resolución. ....	36
Figura 29: Principio de operación del dispositivo WaveStar. ....	43
Figura 30: (a) WaveStar en operación / (b) WaveStar en protección por tormenta. ....	43
Figura 31: Vista en elevación de WaveStar. ....	44
Figura 32: Mapa energético de la costa chilena (promedio anual año 2010).....	45
Figura 33: Vista en planta del sector geográfico del estudio. ....	46
Figura 34: (a) Vista general de carta náutica de Lebu / (b) Detalle de sector del proyecto en carta náutica. ....	47
Figura 35: Ubicación del punto de proyecto. ....	47
Figura 36: Punto de estudio del Explorador de Energía Marina para caso práctico, .....	48
Figura 37: Matriz de generación energética del WaveStar en kW.....	50
Figura 39: Ubicación de subestación de Lebu respecto a Lebu y WaveStar, .....	52
Figura 40: Trazo total de transporte eléctrico.....	53
Figura 41: Análisis de sensibilidad por aumento anual en Pe. ....	59
Figura 42: Análisis de sensibilidad por variación del factor de planta, .....	60
Figura 43: Análisis de sensibilidad por variación de capacidad de generación WaveStar, .....	61
Figura 44: Análisis de sensibilidad por variación de costo WaveStar, .....	62
Figura 45: VAN distribución uniforme.....	66
Figura 46: TIR distribución uniforme. ....	66
Figura 47: PRI distribución uniforme. ....	67
Figura 48: VAN distribución triangular.....	68
Figura 49: TIR distribución triangular. ....	68
Figura 50: PRI distribución triangular. ....	69
Figura 51: Flujo de caja de caso práctico.....	82

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudia la prefactibilidad técnico-económica de implementar un dispositivo de captación de energía undimotriz en Chile. El dispositivo seleccionado para el estudio es el WaveStar y el lugar de ubicación es en la costa de Lebu, Región del Biobío. A partir de esto se realizan distintas labores, dentro de las cuales se encuentran, por ejemplo, la caracterización del clima de oleaje, estimación de costos de construcción, entre otros. Una vez definidos todos los aspectos técnicos y económicos del proyecto se procede a realizar una evaluación económica mediante un flujo de caja. Los resultados obtenidos muestran que el proyecto es inviable debido a que no es rentable, con un VAN de, aproximadamente, -37,9 millones USD, una TIR de -1% y un PRI de más de 20 años (horizonte del proyecto).